

論文 ダンベル型供試体を用いた一軸引張試験によるコンクリート U カット補修部のひび割れ挙動の評価

新家 一秀^{*1}・佐藤 あゆみ^{*2}・林 承燦^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 模擬ひび割れと U カット部を有するダンベル型供試体に HPFRCC を含む表面被覆材を塗布し、一軸引張試験を行って、U カット部における充填材と表面被覆材のひび割れ挙動を明らかにする方法を提案した。U カット部の充填材の種類や U カット部の大きさが異なれば、表面被覆材のひび割れ挙動も異なる様子を確認できた。U カット部の充填材や母材モルタルのひび割れは表面被覆材のひび割れ挙動に影響しており、母材モルタルのひび割れ発生範囲が広がると表面被覆材 HPFRCC のひび割れ追従性も大きくなった。

キーワード: 一軸引張試験, ダンベル型供試体, 表面被覆材, 充填材, U カット, ひび割れ追従性

1. はじめに

コンクリート構造物の表面に補修材を被覆する補修では、既設コンクリートのひび割れ部において、補修後早期に被覆材表面に大きなひび割れが生じることがある。これは、外力や温度変化などによる既設コンクリートの変形にともなって既設コンクリートひび割れ部の開口幅が変動し、表面被覆材（以下、被覆材）がその変動に追従できないためと考えられている。被覆材にはひび割れ部の開口幅の変動に追従する、いわゆるゼロスパンでのひび割れ追従性が求められているが、塗布厚さが 5mm を超えるような無機系材料の評価方法は未だ確立していない。著者らは、模擬ひび割れを有するダンベル型供試体の一軸引張試験¹⁾により、表面被覆材の種類と厚さが異なる場合のひび割れ追従性を評価した²⁾。

既設構造物のひび割れ部には、注入工法や充填工法により補修した後に、表面被覆などの補修を行うことが一般的である。充填工法の一つである U カットシーリング材充填工法(以下、U カット充填工法)は、ひび割れに沿ってコンクリート表面を U 字形にはつり、充填材を詰めて補修する方法である。著者らは、被覆材として変形性能に優れた複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材(以下 HPFRCC: High Performance Fiber Reinforced Cement Composite) の適用を進めており²⁾、ゼロスパンでの引張力が作用する環境においても HPFRCC のひび割れ追従性が期待できると考えている。しかし、U カット補修部における被覆材 HPFRCC のひび割れ追従性については、十分には明らかになっていない。

本研究においては、模擬ひび割れを有するダンベル型供試体を用いた一軸引張試験方法の応用範囲を拡張し、U カット補修部における HPFRCC を含む被覆材と充填材

のひび割れ挙動を評価することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類

母材モルタル製のダンベル型供試体（以下、母材モルタル供試体）を中央で二分割して、模擬ひび割れを導入した。模擬ひび割れの補修では、U カット充填工法と表面被覆を行った。表-1 に、供試体名と試験条件を示す。各試験条件で供試体を 3 体ずつ作製した。模擬ひび割れの無い供試体（供試体名：NC-）も作製した。

2.2 使用材料と配合

5N/mm² 程度の脱型強度を早期に発現させ、少ない型枠で短期間に複数のダンベル型供試体を作製するため、母材モルタルには、超速硬セメントを用いた。細骨材には川砂を用い、W/C=45%、S/C=2.0 とした。被覆材には HPFRCC および補修用ポリマーセメントモルタル(以下、PCM)の 2 種類を使用し、U カット部の充填材には HPFRCC と PCM ならびに市販の塗膜防水用・ポリマーセメント系塗膜防水材(以下、SPCM)を使用した。使用材料の配合を表-2 に示す。

2.3 母材モルタル供試体

母材モルタル供試体の形状寸法を図-1 に示す。引張試験領域の寸法は、長さ 80mm、幅 30mm、厚さ 30mm とした。母材モルタル供試体は、打設後 3 時間で脱型し、28~30 日間、室温 20℃、相対湿度 50%の恒温恒湿室内にて養生を行った。

2.4 模擬ひび割れと U カット部

(1) 母材モルタル供試体への模擬ひび割れの導入

母材モルタル供試体を、3 点曲げ試験により供試体中央部で二分割し模擬ひび割れを導入した。二分割した母

*1 トーヨーマテラン株式会社 技術部 (正会員)

*2 熊本大学 自然科学研究科環境共生工学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社デーロス・ジャパン 企画開発部 博士(工学) (正会員)

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

材モルタル供試体の破断面を平滑な木製板上の粘着テープの上で突き合わせ、クラックスケールを用いて模擬ひび割れの幅を 0.3~0.5mm に調整した後、両側面と底面を粘着テープで固定した。供試体の移動や一軸引張試験装置への設置を、供試体に変形や力が生じないように注意して行った。

(2) Uカット部の作製と充填

母材モルタル打設時に、U型の埋設物（長さ 30mm、幅×厚さ 15×20mm（基準サイズ）または 10×15mm（小サイズ））を供試体の打設面中央に埋め込み、脱型時にこれを取り除いてUカット部を作製した。

Uカット部への材料の充填では、Uカット部の最底面が中心となるように固定し、充填面をワイヤブラシで処理した後、材料を充填した。Uカット部の充填から表面被覆までの3日間、室温 20℃相対湿度 50%の恒温恒湿室内にて充填材の養生を行った。

2.5 表面被覆

被覆材の塗布面は、表面被覆の前に#60 サンドペーパーを装着したディスクグラインダーにて処理を行った。被覆範囲は、母材モルタル供試体の打設面上で幅 30mm、長さ 300mm とした（図-1 参照）。被覆材の被覆厚さは、HPFRCC、PCM とともに 5mm と 10mm の2種類とした。室温 20℃相対湿度 50%の恒温恒湿室内にて被覆材の養生を行い、2週間後に一軸引張試験を行った。

母材モルタルと被覆材およびUカット充填材の性能を評価するため、ダンベル型引張供試体と圧縮供試体（直径×高さ 50×100mm）を作製した。性能評価用のダンベル型引張供試体の引張試験領域の寸法は、長さ 80mm、幅 30mm、厚さ 15mm（母材モルタルでは 30mm）とした。

養生は室温 20℃相対湿度 50%の恒温恒湿室内で行い、表面被覆材とUカット充填材は材齢 14 日目に、母材モルタルは 28 日目に一軸引張試験と圧縮試験を行った。

2.6 一軸引張試験

一軸引張試験装置を図-2 に示す。供試体の下端を固定支持、上端を回転支持とした。容量 10kN、精度 5N のロードセルを使用して荷重を計測した。容量 25mm、精度 2μm の変位計を供試体の両側に取り付け、変位計 2 本の平均値より、検長区内（80mm）のひずみを求めた。供試体の形状と供試体つかみ具の位置関係を図-1 に示す。一般に、引張試験においては、ひび割れ発生後、ひび割れの伝播にともなって供試体断面における引張ひずみの分布が変化し、供試体に曲げ変形が生じることが知られている。本研究においては、供試体つかみ具の中心線を、ひび割れ有り供試体では引張方向の被覆材の中心線に一致させ、Uカット供試体では、被覆材と母材モルタルの界面に一致させて引張試験装置に設置した。载荷の初期に供試体がくの字に曲がりにくいように、図-2 に

示す掴み具の固定具を用いて供試体を挟みこんだ。最初のピーク荷重までは引張ひずみ分布ができるだけ均一となり、曲げ変形が生じにくいようにした²⁾。被覆材が破壊した時点が大きな局所ひび割れを肉眼で確認した時点で、载荷を終了した。

表-1 供試体と試験条件

供試体名	模擬ひび割れ	被覆材		Uカット充填材		
		材料	厚さ (mm)	材料	Uカット寸法(mm)	
NC	無し	無し	—	—	—	
NC-H5	無し	HPFRCC	5	—	—	
NC-H10			10			
NC-P5		PCM	5			
NC-P10			10			
H5	有り	HPFRCC	5	—	—	
H10			10			
P5		PCM	5			
P10			10			
H5-P1520	有り	HPFRCC	5	PCM	15*20	
H10-P1520			10			
P5-P1520		PCM	5			
P10-P1520			10			
H5-S1520	有り	HPFRCC	5	SPCM	15*20	
H10-S1520			10			
P5-S1520		PCM	5			
P10-S1520			10			
H5-H1520	有り	HPFRCC	5	HPFRCC	15*20	
H10-H1520			10			
H5-H1015			HPFRCC	5	HPFRCC	10*15
H10-H1015				10		

表-2 使用材料の配合

名称	配合
HPFRCC	プレミックスタイプ、水結合材比:0.36、 繊維混入量:1.9vol%
PCM	ポリマーセメントモルタル、 混和液結合材比:0.43、砂セメント:比1.5
SPCM	ポリマーセメント系塗膜防水剤、 混和液粉体比:0.75

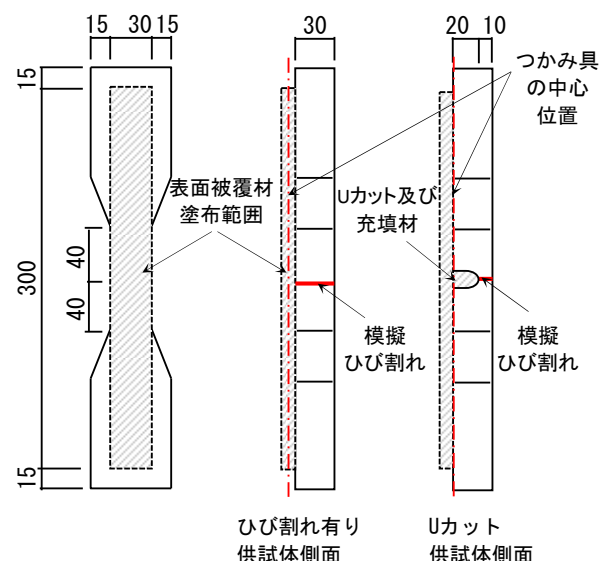


図-1 供試体の形状寸法と供試体つかみ具の位置関係

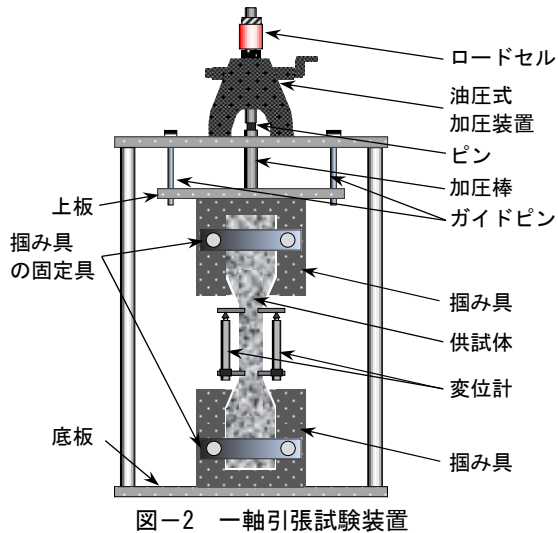


図-2 一軸引張試験装置

表-3 使用材料の性能

種類	供試体厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	引張終局ひずみ (%) ^{*1}	圧縮強度 (N/mm ²) ^{*2}
母材モルタル	30	3.29	0.02	41.6
HPFRCC	15	6.78	5.58	38.5
PCM	15	4.30	0.02	43.7
SPCM	15	0.47	4.36	1.6

*1引張応力が急激に低下し始める軟化開始点の引張ひずみ

*2母材モルタルは材齢28日, その他材齢14日

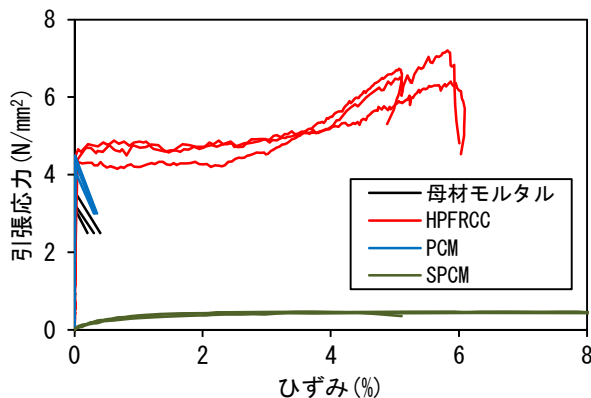


図-3 使用材料の一軸引張試験結果

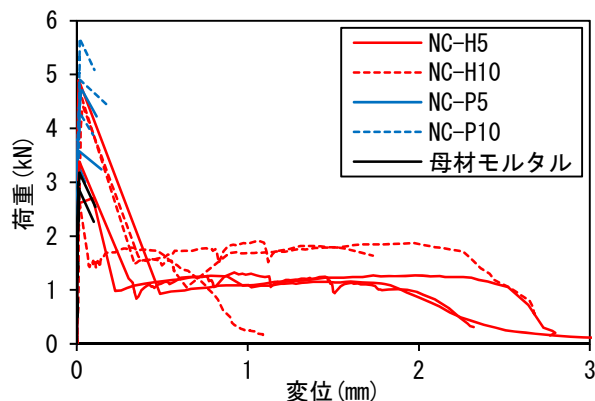


図-4 ひび割れ無し供試体の一軸引張試験結果

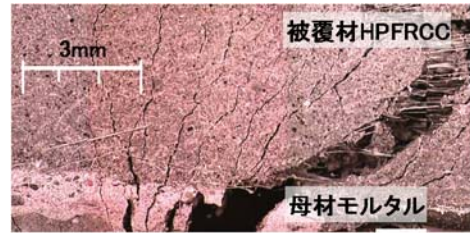


図-5 NC-H10のひび割れ状況

3. 模擬ひび割れ部における表面被覆材のひび割れ挙動

3.1 使用材料の圧縮および引張性能

全ての使用材料の圧縮および一軸引張試験結果を表-3に、一軸引張試験による引張応力-ひずみ曲線を図-3に示す。圧縮強度においては、母材モルタル、HPFRCCおよびPCMは約40N/mm²であるが、SPCMは他の材料の1/20程度であった。引張性能においては、母材モルタルやPCMの場合ひび割れ発生とともに破壊する結果となった。しかし、HPFRCCはひび割れ発生後も引張応力の低下がなく、複数微細ひび割れの発生とともにひずみが増加する傾向を示した。SPCMの場合、引張強度はHPFRCCの1割程度であるが、ひび割れが生じることなくひずみが増加する傾向となり、破壊時のひずみが10%程度と可とう性に優れていた。

3.2 ひび割れ無し供試体の引張性能

ひび割れを設けてないダンベル型母材モルタル供試体に、HPFRCC並びにPCMで表面被覆した供試体の一軸引張試験による引張荷重-変位曲線を図-4に示す。

初期ひび割れ発生荷重においては、HPFRCCおよびPCMで表面被覆による断面寸法の増加に伴い、初期ひび割れ発生荷重も大きくなる傾向を示したが、被覆厚さの差は明らかではなかった。

初期ひび割れ発生においては、PCM被覆供試体の場合、初期ひび割れ発生とともに破壊する傾向を示した。しかし、HPFRCCで被覆した場合、母材モルタル破壊による初期ひび割れ発生とともに急激に荷重が低下したが、HPFRCCは破壊せず、HPFRCCで荷重が保持されひび割れ追従性が認められた。また、初期ひび割れ発生後の荷重は、被覆厚さが厚いほど高い結果となった。図-5に示すNC-H10供試体のひび割れの写真から、局所化した母材モルタルの大きなひび割れとは別に、HPFRCCに微細なひび割れが分散して生じ、母材モルタルのひび割れ後の供試体の変位増加にHPFRCCが追従していることがわかる。

3.3 ひび割れ有り供試体の引張性能

母材モルタル供試体に模擬ひび割れを導入した供試体のうちHPFRCCあるいはPCMで表面被覆し、一軸引張試験を行って得られた荷重-変位曲線を、図-6に示す。全体として最大引張荷重に至るまで、荷重が緩やかに上

昇する傾向が見られた。

被覆材が PCM の場合 (図-6 で P5, P10), 最大引張荷重が約 0.2kN と低く, 被覆厚さが異なっても最大引張荷重に大きな差は見られなかった。PCM の最大引張荷重を強度に換算すると, 被覆厚さ 5mm の場合で 1.3N/mm², 被覆厚さ 10mm の場合で 0.7N/mm² となり, 表-3 に示す PCM 単体での引張強度の 1/3~1/6 程度と小さかった。これは, 母材モルタルに導入した模擬ひび割れが切欠きとなり, 被覆材に局所的な応力が生じたためと考えられる。

被覆材が HPCRCC の場合 (図-6 で H5, H10), 最大荷重に至るまで, 荷重が緩やかに上昇する傾向を示し, 母材モルタルに模擬ひび割れが無い供試体 (図-4 で NC-H5, NC-H10) と比較すると, 変位が 0.5mm 程度以降の荷重

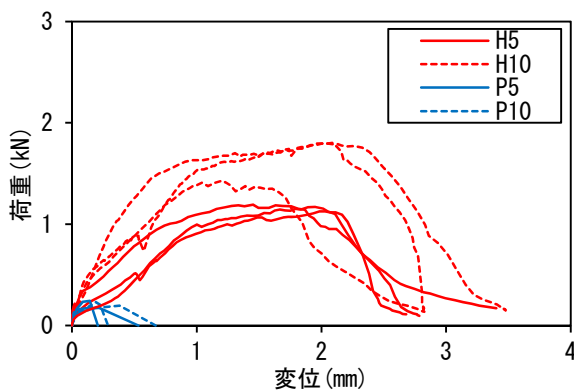


図-6 HPCRCCあるいはPCMで被覆した模擬ひび割れ有り供試体の一軸引張試験結果

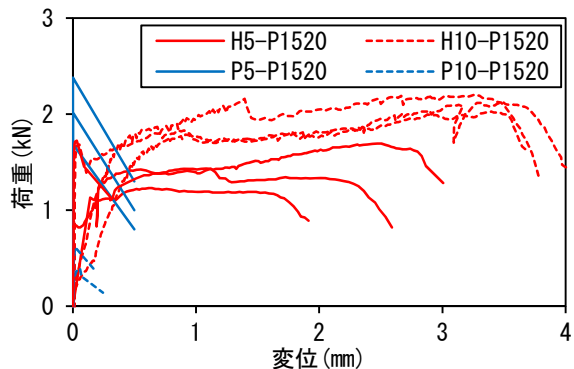


図-7 Uカット部にPCMを充填した供試体の一軸引張試験結果

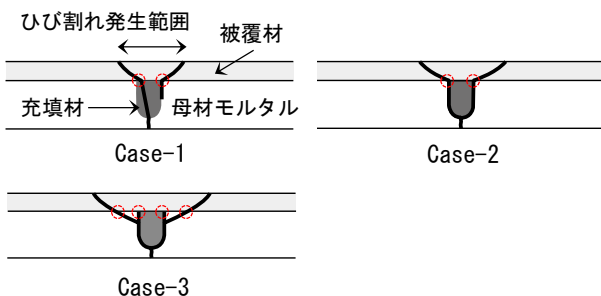


図-8 Uカット部にPCMを充填した供試体のひび割れ

は同程度であり, ひび割れ追従性がみとめられた。これは, 模擬ひび割れがある供試体でも被覆材 HPCRCC により引張力が受け持たれているためと考えられる。

4. Uカット補修部のひび割れ挙動

4.1 充填材料の影響

(1) Uカット部にPCMを充填した場合

図-7に, Uカット部の充填材をPCMとし, PCMまたは HPCRCC で被覆した供試体の一軸引張試験から得られた荷重-変位曲線を示す。被覆材が PCM の場合, 初期ひび割れ発生と同時に被覆材が破壊したが, 図-6に示す U カット部が無い供試体よりも引張荷重が高くなった。被覆厚さ 10mm に比べ, 被覆厚さ 5mm の方が, 引張荷重が高くなった。この原因については, よくわからなかった。被覆材が HPCRCC の場合, 被覆厚さ 5mm よりも 10mm の方が引張終局変位 (最大引張荷重点に対応する変位) は, 1.5 倍程度大きくなっており, U カット部の無い供試体 (図-6) よりも, 荷重を保つ変位の区間が大きくなり, その傾向は被覆厚さが厚いほど明らかに現れた。

U カット部に PCM を充填した供試体の一軸引張試験後のひび割れは, 図-8に示すように3種類に分類される。

Case 1 : 充填材の内部および充填材と母材モルタルとの界面の一部にひび割れが発生

Case-2 : 充填材と母材モルタルとの界面でひび割れが発生

Case-3 : 充填材と母材モルタルとの界面と U カット付近の母材モルタルの一部にひび割れが発生

Case-3 のひび割れでは, 他の 2 種とひび割れと比べ, 変位が大きくなる傾向にあった。U カット部に PCM を充填した場合, いずれも充填材と母材モルタルとの界面に付着破壊が生じた。

(2) Uカット部にSPCMを充填した場合

U カット部の充填材を SPCM とし, PCM または HPCRCC で被覆した供試体の一軸引張試験により得られた荷重-変位曲線を, 図-9に示す。被覆材が PCM の場合, SPCM に柔軟性があるため, 供試体は急激には破壊せず, U カット部の充填材が破壊する前に被覆材 PCM が破壊した。図-6に示す U カット部の無い供試体に比べ, 最大引張荷重は 2 倍程度となり, 緩やかに荷重が低下し破壊に至る結果となった。被覆材が HPCRCC の場合, 被覆厚さが 5mm よりも 10mm の方が引張終局変位が大きくなった。厚さ 10mm の HPCRCC で被覆した供試体のうち 1 体では, 一軸引張試験中に被覆材が破壊する前に母材モルタルに複数のひび割れが生じた。

U カット部に SPCM を充填した供試体の一軸引張試験後のひび割れは, 図-10に示すように 3 種類に分類され

る。

Case-4: 充填材の高さの半分程度までひび割れが発生し、母材モルタルと充填材との境界から被覆材にひび割れが発生

Case-5: 充填材にひび割れが発生し、母材モルタルと充填材との境界から被覆材にひび割れが発生

Case-6: 母材モルタルに複数のひび割れが発生するとともに、充填材の中央部からもひび割れが発生
被覆材の厚さが 5mm の場合には Case-4 のひび割れ、被覆材の厚さが 10mm の場合には Case-5 または Case-6

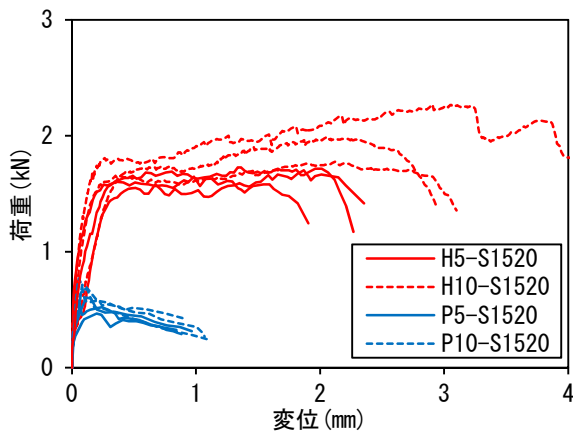


図-9 Uカット部にSPCMを充填した供試体の一軸引張試験結果

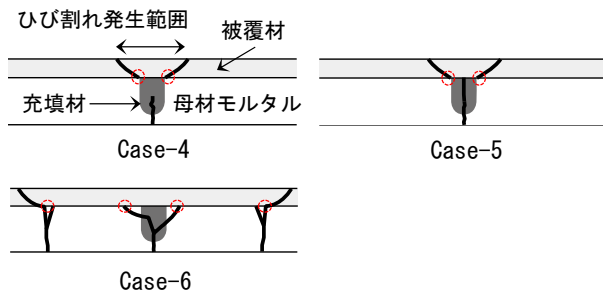


図-10 Uカット部にSPCMを充填した供試体のひび割れ

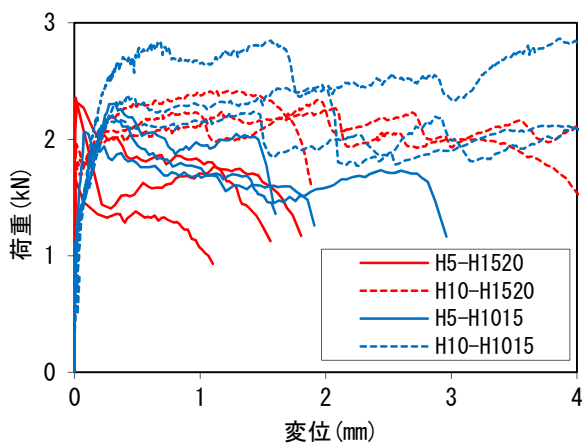


図-11 Uカット部にHPFRCCを充填した供試体の一軸引張試験結果

のひび割れとなった。充填材が PCM の場合と異なり、充填材 SPCM にひび割れが生じるのは、SPCM の強度が低いためと考えられる。

(3) U カット部に HPFRCC を充填した場合

図-11 に、2 種類のサイズの U カット部に HPFRCC を充填し、HPFRCC で被覆した供試体を一軸引張試験して得られた荷重-変位曲線を示す。基準サイズの U カット部を有する供試体(H5-H1520 と H10-H1520)に注目すると、被覆 HPFRCC の厚さが 5mm の場合、充填材が PCM あるいは SPCM の供試体に比べて、初期ひび割れ発生時の荷重は高いが、終局変位が小さくなる傾向が見られた。

U カット部が基準サイズの供試体のひび割れは、図-12 に示すように、3 種類に分類される。

Case-7: 充填材にひび割れが発生し、Y 字状に被覆材にひび割れが発生

Case-8: 充填材と母材モルタルとの界面の片側から Y 字状に被覆材にひび割れが発生

Case-9: 母材モルタルに複数のひび割れが発生 (被覆厚さ 10mm の場合)

U カット部が基準サイズの供試体では、ひび割れが U カット部付近より、Y 字状に発生する傾向にあった。

4.2 U カットのサイズの影響

図-11 からわかるように、充填材と被覆材に HPFRCC を用いた供試体で U カット部が基準サイズの場合と小サイズの場合とを比較すると、初期ひび割れ発生時の引張荷重は同程度であったが、基準サイズに比べ小サイズの方がその後の荷重が大きく、引張終局変位も大きくなる傾向にあった。

U カット部が小サイズの供試体のひび割れ(Case-10~12)を、図-12 に併記する。U カット部付近より Y 字状にひび割れが発生した基準サイズの場合(Case-7~9)とは異なり、小サイズの場合(Case-10~12)には、母材モルタル

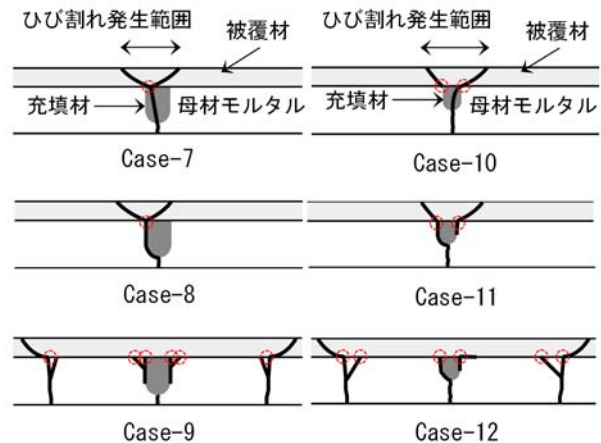


図-12 Uカット部にHPFRCCを充填した供試体のひび割れ

と充填材との境界から被覆材へひび割れが発生する傾向にあった。図-12 に赤○印で示すように、小サイズの場合、母材モルタル(もしくは充填材)側で発生し被覆材に進展するひび割れの本数が、基準サイズの場合より多かった。このことが、Uカット部が基準サイズに比べ小サイズの場合に最大引張荷重が高く、引張終局変位も大きくなることに影響したと推察される。

4.3 表面被覆材 HPFRCC のひび割れ挙動

被覆材に HPFRCC を使用した供試体について、ひび割れ挙動を比較するため、各供試体の一軸引張試験で得られた引張終局変位(荷重を安定して保持できず、急激に低下し始める点)と試験終了後の被覆材のひび割れ発生範囲とを図-13 に示す。引張終局変位と被覆材のひび割れ発生範囲は各供試体の平均値とした。被覆材のひび割れ発生範囲は、供試体の引張終局変位のほぼ 20 倍に相当しており、引張終局変位が大きくなるとひび割れ発生範囲も大きくなる傾向がみられた。

全体として、被覆材 HPFRCC の厚さ 5mm よりも厚さ 10mm の方が引張終局変位と被覆材のひび割れ範囲が大きくなったことから、被覆材の厚さが厚くなると、ひび割れ追従性が大きくなると考えられる。今回の試験の範囲内では、HPFRCC 被覆厚さ 10mm、Uカット部充填材に HPFRCC を使用した供試体で、Uカット部寸法が 10×15mm(小サイズ)の供試体(H10-1015)において、引張終局変位が最も大きくなった。これは、引張試験時に母材モルタルのひび割れ発生範囲が広がることで、表面被覆材に達するひび割れが増加(図-8, 10, 12 中の赤○印)したことが要因と考えられる。

以上のことから、Uカット部の充填材の種類やUカット部の大きさが異なれば、表面被覆材 HPFRCC のひび割れ追従性も異なることがわかる。特に表面被覆材下部のUカット部の充填材や母材モルタルのひび割れが表面被覆材のひび割れ挙動に影響しており、母材モルタルのひび割れ発生範囲が広がると被覆材 HPFRCC のひび割れ追従性も大きくなった。

5. まとめ

本研究では、模擬ひび割れとUカット部を有するダンベル型供試体に HPFRCC を含む表面被覆材を塗布し、一軸引張試験を行って、Uカット部における充填材と表面被覆材のひび割れ挙動を明らかにする方法を提案し、その有効性を確認した。

模擬ひび割れが無い供試体に PCM を表面被覆した場合にはひび割れの発生と同時に被覆材が破断した。一方、HPFRCC を被覆した場合には、母材モルタルにひび割れが発生すると、一旦荷重が急激に低下するものの、HPFRCC は破断せず、HPFRCC で荷重が保持され、ひび

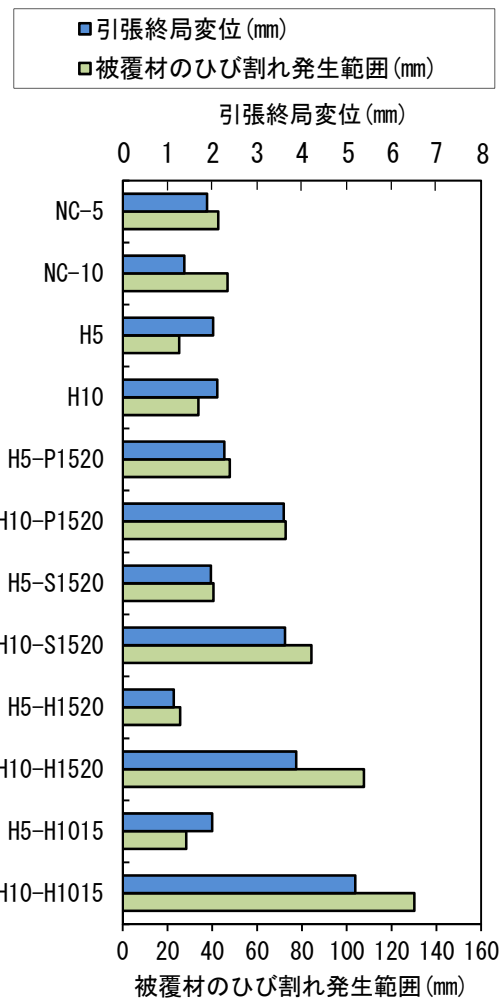


図-13 被覆材HPFRCCを用いた供試体の引張終局変位とひび割れ発生範囲

割れ追従性が認められた。また、模擬ひび割れを有する供試体に HPFRCC を被覆した場合においてもひび割れ追従性が認められた。

Uカット部の充填材の種類やUカット部の大きさが異なれば、表面被覆材のひび割れ挙動も異なっていた。Uカット部の充填材や母材モルタルのひび割れは表面被覆材のひび割れ挙動に影響しており、母材モルタルのひび割れ発生範囲が広がると被覆材 HPFRCC のひび割れ追従性も大きくなった。

参考文献

- 1) 土木学会(編): 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー127, 316 pages, 2007
- 2) 新家一秀, 佐藤あゆみ, 浅野幸男, 小林孝一, 六郷恵哲: コンクリート用表面被覆材を対象としたダンベル型供試体を用いたゼロスパン一軸引張試験方法の提案, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第12巻, pp.395-400, 2012